冰冻圈生态系统：全球变化的前哨与屏障

王根绪[1*] 杨 燕[1] 张光涛[2] 常瑞英[1]

1 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 成都 610041
2 中国科学院海洋研究所 青岛 266071

摘要 冰冻圈与生物圈间密切的互馈作用关系在全球变化下不断加强，深刻影响着全球环境治理和人类社会可持续发展。文章从冰冻圈生态系统基本格局与功能、对变化环境的响应过程及适应性策略等角度，全面阐释了冰冻圈生态系统的分布格局及其在全球生态系统功能与人类福祉中的作用、冰冻圈生态系统对全球变化的高度敏感性与指示性、冰冻圈生态系统在生物多样性维持及生物生产力增效等方面的屏障作用等，提出了变化环境下冰冻圈生态系统健康维持的有效调控路径；从而较为系统地介绍了冰冻圈生态学的基本内涵与学科进展，并指出了冰冻圈生态学未来主要发展趋势。

关键词 冰冻圈生态系统，结构与格局，碳库，生物多样性，影响，调控

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20200401002

冰冻圈通过存储或调节释放大量的能量，以及水汽、甲烷（CH_4）、二氧化碳（CO_2）、一氧化二氮（N_2O）和其他生源要素等反馈影响全球气候变化，并作用于生物圈、水圈等其他圈层[1]。冰冻圈是气候系统最敏感的圈层：气候变暖促使冰冻圈各要素的冰量总体处于亏损状态，以相变能量变化主导物质与能量循环发生改变，并导致各类生态系统从生境、组成结构、食物网、分布格局等全方位产生异变。气候变暖对生态系统的影响比其他区域更为深刻和广泛。冰冻圈剧烈变化对冰冻圈作用区生态系统本身及其服务功能产生较大影响，但生态系统变化对冰冻圈又具有强烈的反馈作用。这些作用与反作用及其链式环境与发展影响形成于冰冻圈，但其波及影响范围甚至是全球性的。因此，冰冻圈生态学在全球环境治理、推动人类社会可持续发展方面具有十分重要的地位和作用。在全球变化背景下，伴随人类社会可持续发展对冰冻圈依赖程度不断增强，迫切需要从冰冻圈和生物圈密切的相互作用关系出发，探索应对变化环境的生态系统保护与服务功能的可持续维持，冰冻圈生态学学科应运而生，并在全球变化和可持续发展研究热潮

*通讯作者
资助项目：国家自然科学基金国际（地区）合作项目（41861134039），国家自然科学基金重大计划重点项目（91547203）
修改稿收到日期：2020年4月1日

中得以飞速发展。

1 冰冻圈生态系统的基本特点与功能

冰冻圈环境给定了特殊的物理、化学和生物条件，适应于这一环境的生物及其与这一环境的相互关系构成了冰冻圈生态系统。从圈层角度来看，冰冻圈生态学就是研究生物圈与冰冻圈相互作用的学科。因此，系统理解冰冻圈中的生物圈特性及其生态系统结构与功能，是冰冻圈生态学的基本任务。

一般而言，随着纬度和海拔高度的增加，冰冻圈作用愈加强烈，因而生境愈加严酷，食物网的复杂性与多样性方面应该具有显著降低的趋势。然而，即使在极高纬度的北极地区，尽管其陆地初级生产力很低，但生产者（植物）、初级消费者（草食动物）、高级消费者（食肉动物）和分解者这 4 个营养水平都存在[2]。这种特性也存在于青藏高原海拔 4 000 m 以上的大部分地区。在次区域尺度上，北极和青藏高原陆地生物群落具有多样的镶嵌体，这些镶嵌体由气候、基质和水文的梯度变化等多种非生物因素共同作用形成。例如，其具有的独特的 α 和群落（β）多样性就是由冰冻圈（积雪和多年冻土）因素作用形成的[3,4]。在基于生态位的因素中，冰冻圈内由与地貌相关的因素、热量梯度、冰川史、冻土发育史、洋流等众多因素共同作用形成丰富多彩的栖息地环境。例如，在海洋冰冻圈环境中，冰层覆盖为北极生物提供了独特的异质性栖息地，在冰层表面的底部（次生底部栖息地）和顶部（融水池）都有独特的动、植物；即便不包括海冰下面的海洋生态系统，冰雪中也有完整的食物网结构（图 1）。在泛北极大陆和青藏高原多年冻土区，冻融循环和热喀斯特等与冰相关的过程，创造了一个动态的淡水湖塘和沼泽湿地星罗棋布镶嵌分布的高度异质性空间格局。这种栖息地的异质性叠加在各类冰冻圈与岩石圈相互作用的空间变化上，形成了冰冻圈特殊的高度异质性生物多样性分布格局。由此造就了青藏高原和整个北极地区存在大量的全球性高度生物多样性的区域热点[5]。

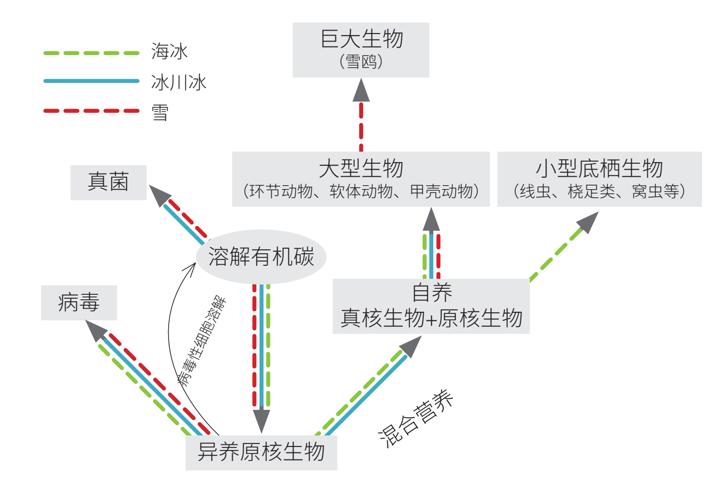


图 1　海冰、冰川冰与雪环境中的食物网结构 [6]

在生态系统功能（或者重要性）方面，冰冻圈生态系统功能除了与其他生态系统相似的生物生产、能量流动、物质循环和信息传递等以外，还有其特殊功能或重要性。

（1）冰冻圈要素的调控作用。植被对冻土形成与分布的影响具有普遍性，其机制表现在植被覆盖对地表热动态和能量平衡的影响，以及植被覆盖对表层土壤有机质与土壤组成结构方面的作用；土壤有机质与结构变化将导致土壤热传导性质的改变，从而影响活动层土壤水热动态（图 2）。这是生态系统对冰冻圈要素具有强大保育功能的具体表现，同样的作用也体现在对海冰减缓融化速率的作用方面[7]。由于冰冻圈特殊的生物环境与生境特点，不同冰冻圈要素对生态系统具有不同的作用途径、方式与生物学机理。例如，积雪厚度与融化时间等不仅决定了植被类型及其群落组成，而且也对植物的生态特性起着关键作用 [8]。冰川消融通过增加径流，向干旱区或海岸带环境提供更加丰富的淡水、养分和有机碳等物质，从而较大幅度改变下游或海洋生态系统。多年冻土则通过对水循环、生物地球化学循环的影响，制约生态系统类型、分布格局、生产力及生物多样性。

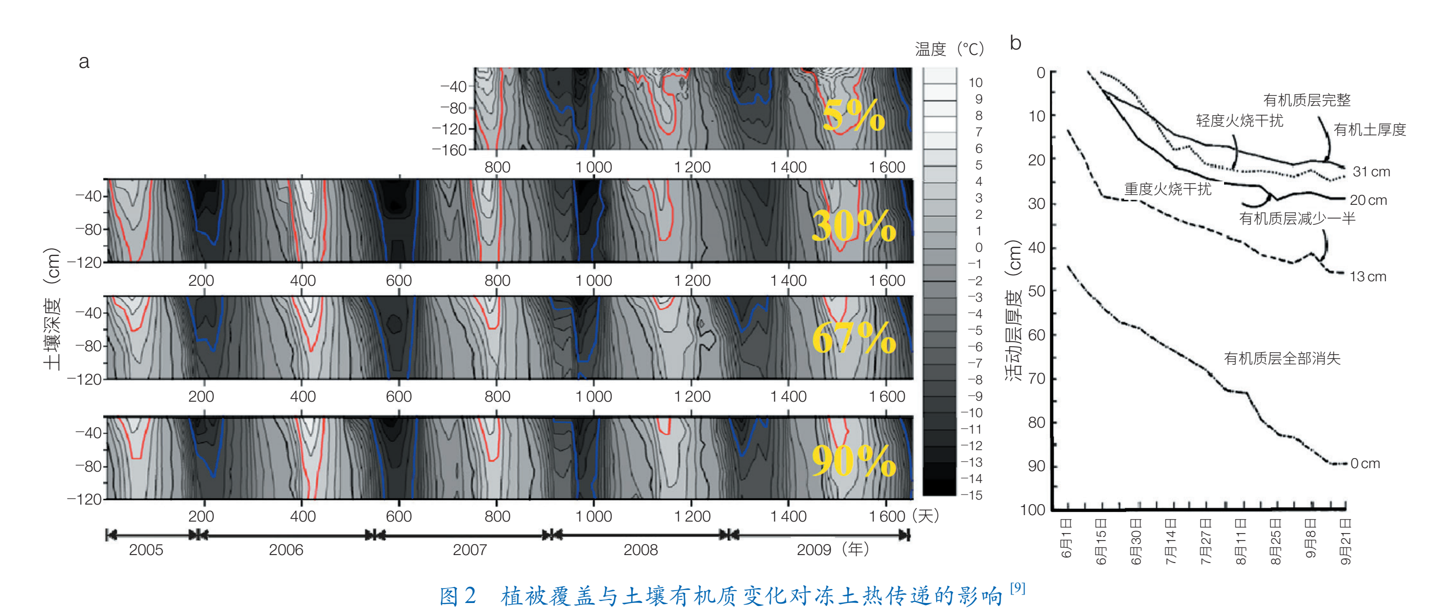


图 2　植被覆盖与土壤有机质变化对冻土热传递的影响[9]

（a）不同植被覆盖（自上而下依次为5%、30%、67%和90%）下活动层温度变化等值线图（红线示4℃），横坐标为2005—2009年的天数；（b）土壤有机质厚度变化对活动层厚度的影响

（2）生态系统碳氮库的巨大冷储效应。整个北半球多年冻土区的3 m深度范围内土壤有机碳库大致为1 672 Pg C，该值相当于全球地下碳库的50%[10]，因此冰冻圈碳库在全球碳平衡中占据极其重要的位置。另外，在北极、亚北极植被的净生产力中，每年大约有2.47×10^9 t的碳以凋落物的形式进入土壤圈。另外，在北极地区和青藏高原多年冻土区广泛分布的地衣和苔藓植物中因丰富的蓝藻细菌而具有重要的固氮作用。在北极地区的一些流域中，这些固氮作用每年固氮量可达0.8—1.31 kg N/hm^2，占据流域总氮输入的85%—90%。

2 冰冻圈生态系统对全球变化的响应与适应

冰冻圈生境要素对气候变化的高度敏感性，导致冰冻圈生态系统整体上是地球表面对气候变化最为敏感的生物部分，现阶段我们对于陆地生态系统响应气候变化的绝大部分认知来源于冰冻圈生态系统。系统理解各种冰冻圈变化对生物圈的影响与调节作用及生物圈对冰冻圈的反馈是冰冻圈生态学的核心内容。

2.1 全球变化的前哨：敏感性与指示性

近30年来，陆地上生态系统变化幅度最大的区域是北极苔原分布区，表现在植被指数（NDVI）的普遍性增加和生物量增大，其直接原因是灌丛大幅度扩张，以及苔原植被群落的演替（图3a）。生产力的变化往往与植物群落组成的变化有关。因此，大部分苔原地区一些高地生境的草和灌木的覆盖增加[11]。在苔原地带“变绿”的同时，泰加林带则呈现“变黄”，产生森林退化的原因与冻土退化关系密切，即冻土退化导致森林植被被湿地草甸植被所取代和冻土退化导致干旱胁迫加剧。青藏高原植物群落的演替也十分剧烈。伴随冻土退化，在20世纪80年代—20世纪90年代及21世纪最初的5年间，青藏高原高寒草地曾一度出现了较为严重的退化演替（图3b）。另一个生态敏感性变化的指示是植被的物候普遍性和大幅度改变，北极地区和青藏高原均发现较为显著的植物春季生长提前和秋季生长延迟，以及繁殖物候改变等。这种变化对生物多样性的作用是负面的，北极地区因为灌丛植被生长延长、遮阴作用增大和对积雪拦截厚度增大，导致禾草类和隐花植物大量消失。

整个海洋冰冻圈生态系统对气候变化的响应可能最主要是由海冰消退传导的。围绕海冰生境，既有群落内的食物链级联反应，也会通过有机物沉降和生物

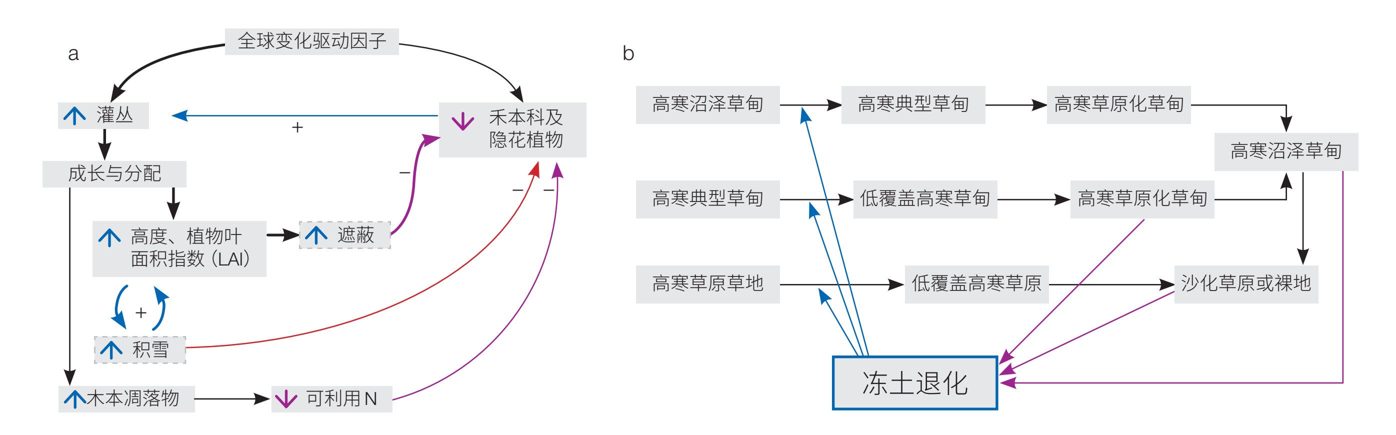


图 3　冰冻圈变化引起的生态系统的级联和反馈影响

（a）北极多年冻土带增温导致灌丛取代苔原植被[2]；（b）青藏高原冻土退化导致的植被群落演替

迁移等与水体生物群落发生相互作用。不考虑营养盐限制，海冰消退对水体初级生产者的影响肯定是正面的，而对依附海冰生长的冰藻则因地而异——有些地区冰藻类和冰动物群（ice fauna）的多样性和丰度持续减少[12]。对于海冰生境中的消费者，尤其是生活史周期较长的动物，负面影响（如食物链和适宜性生境减少）是主要的。北极海洋哺乳动物被认为是对海冰变化敏感性极强的物种；其中，北极熊、独角鲸和帽海豹被认为是对海冰变化最脆弱的物种，因为它们依赖于特定的海冰栖息地，具有特殊的依赖海冰生境的食物链与捕食习惯[13]。

2.2 生物多样性的避难所

全球变化导致热带和温带大部分地区的生物多样性减少；但现有证据表明，冰冻圈作用区的高海拔山地的生物多样性趋于增加是大概率事件，而高纬度冰冻圈生物多样性增加与减少发生概率几乎相当[2]。高寒山区因其多样的气候梯度，具有应对全球变暖的“缓冲能力”，以维持寒冷生境的避难所。受积雪减少、冰川退缩和多年冻土退化的影响，高山带出现了新的物种栖息地，原有植物群落组成和结构也悄然发生改变[14]。例如，北欧一些高纬度山地林线以上的高山植被带生物多样性和生物量显著增加，物种丰富度递增速率加快[15]。气温上升已经显示出对北极生物多样性的多种影响：南方物种向北迁移、苔原分布区苔藓-地衣为优势的地区被大面积灌木等维管束植物所取代、植物群落及与其相关的动物种群发生变化等。无论是高海拔山地还是高纬度泛北极地区，陆地生态系统生产力则几乎无一例外地表现为显著递增。因此，从生物多样性、生产力和碳库角度，高海拔和高纬度冰冻圈日益成为众多物种逃逸全球变暖的避难所，并扮演着十分重要的生态屏障作用。

在海洋冰冻圈，海冰消退条件下物种向两极的输送作用显著增强。在中纬度海域，生物随着气候变暖分布范围向两极移动已经得到了很好的证明；随着暖流入侵的增强，也有更多的浮游动物类和个体被输送到北冰洋更深的海盆区。在北极海域，这种北移现象在底栖动物和鱼类中更加明显。例如，极地鳕鱼和毛鳞鱼等向北迁徙，引发大量海鸟随之向北扩张，如欧绒鸭在格陵兰岛的分布区域向北延伸了 300 多公里[16]。

2.3 生态系统碳源趋势不断增强

冻土融化将直接或间接地通过改变温度、氧化还原状态和有机物质分解等影响土壤和沉积物中 CO_2 排放量。多年冻土碳库在增温下的大量损失和排放，会显著增加大气温室气体含量，形成正反馈过程[17]（图 4a）。受多年冻土层融化影响区的植被（由于

水文状况的变化，以及矿物和有机土壤的混合等）和微生物群落的变化，也会影响净温室气体通量。北极地区从受干扰最少（寒冷）的禾本科植物占主导地位的苔原到受干扰最多（温暖）的灌木占主导地位的苔原，尽管较大幅度地提高了生产力，但以灌木为主的区域仍然表现出 CO_2 对大气的净损失。这一现象表明，冰冻圈区温室气体可能会持续表现为净排放，而且陆地生物多样性的组成可能决定北极将成为温室气体的源还是汇[18]。

大量冻土冷储的碳也会随着冻土的退化而被释放到河流等水体中（图4b）。增温引起的冻土退化不仅使更多冻土层碳以溶解性和颗粒态碳随径流进入河流和湖泊，而且通过增强地下径流，导致更多的 CO_2 经由地下径流进入河流。在青藏高原冻土区，仅长江源区直门达水文站每年输送到下游的溶解性无机碳（DIC）和溶解性有机碳（DOC）通量分别为 485 Gg 和 56 Gg[19]，且活动层冻融过程对于河流 DIC、DOC 和 CO_2 浓度及通量均有显著影响。在泛北极多年冻土地区河流的研究发现，DOC 输出受到冻土覆盖率和融化层厚度控制，高冻土覆盖率地区 DOC 输出浓度高于低冻土覆盖地区[20]。

气候变暖条件下，极地环境会“由白变蓝（海洋）或者变绿（陆地）”。一方面，这种响应可能对气候变暖造成正反馈（加剧），因为海水吸收热量的能力增强而滞留温室气体的能力减弱。另一方面，反馈作用也可能是负的，即延缓气候变暖的趋势。海冰消退会激发更大的浮游植物水华，并导致底栖动物更快地生长。同时，陆地冰架的崩塌导致更多的微量元素（主要是铁）进入海洋，激发了初级生产力水平，并固定更多的 CO_2。尽管如此，初级生产力的增加是否会增加北冰洋生态系统的碳汇强度存在较大的争议[21]。

3 冰冻圈生态屏障的维护与调控

冰冻圈是全球物种多样性保护和生态功能屏障维护的关键区域。在我国，将近 2/3 的重要生态屏障功能区分布在冰冻圈作用区域；因此，冰冻圈作用区在我国生态屏障建设与维护，以及可持续发展保障方面举足轻重。与地球上的其他生物群落相比，大部分冰冻圈生物群落的特征仍然保持较好的相对原始性和完整性。然而，持续的冰冻圈变化对冰冻圈生态系统威胁日趋严重。从全球冰冻圈生态系统的保护来看，需要采取更加积极有效的调控对策，现阶段全球发展起来的主要调控路径有 3 个方面。

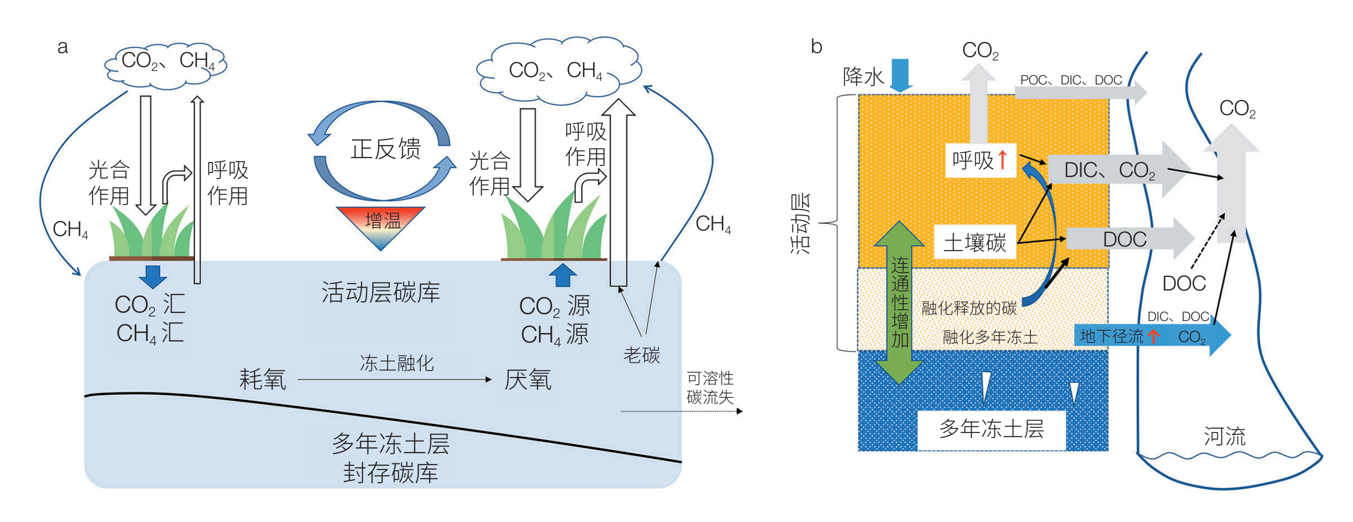


图 4　全球气候变化加剧冰冻圈碳排放和寒区河流碳输出

（a）冰冻圈陆地生态系统碳排放过程；（b）冰冻圈河流碳输出过程

（1）合理管控草食动物种群的生态压力。越来越多的证据表明，气候和草食动物对冰冻圈生态系统的植被群落和主要交错带生态系统具有潜在的双重控制作用[2]。动物草食行为在很大程度上限制区域生态系统生产力和碳汇。例如：北极地区大量的驯鹿啃食导致苔原上的地衣和北极低河岸平原上的高大灌木严重退化甚至消失；加拿大黑雁群数量过多导致北极湿地植物群落退化等[22]。青藏高原三江源国家公园野生草食动物种群迅猛增加，已出现日益严重的家畜和野生动物对草场的竞争问题。多年冻土区食物网中的营养相互作用对冰冻圈要素变化十分敏感，冰冻圈要素的微小变化可能激发食物链营养竞争的剧烈响应。因此，如何合理管控草食动物种群的生态压力，已成为冰冻圈生态系统稳定维持面临的巨大挑战。这种管控需要同时考虑放牧压力增加的积极和消极影响，以及高草食动物密度的其他生态系统的影响等[2]。

（2）加强植被群落结构与生产力的人工改良。从物种、群落和营养网的组成来看，生态系统结构可能决定冰冻圈陆地生态系统是否会成为未来温室气体的汇或是源，是否会加强或减弱区域气候变暖[23]。早已形成的一个共识是植被覆盖变化与冻土环境之间具有显著的互馈影响，维持较高的植被覆盖意味着高的能量吸收、较大的浅层土壤有机质含量及较丰富的凋落物，也可有效抵御啮齿类动物的干扰，这些均有利于冻土环境保护[24]。应对气候持续变暖的冰冻圈变化，需要在进一步明晰群落结构的最优表征基础上，积极探索增加人为引入群落物种的数量（如人工草地植被群落等）和人工植被群落结构的优化方案——既实现退化生态系统结构的恢复与改善，又促进生态系统对冰冻圈环境的保护。

（3）实施基于冰冻圈生态承载力的保护区建设。尽管在冰冻圈作用区构建自然保护区或国家公园被普遍认为是最有效的生态保护措施，但是现阶段已有保护区和国家公园的建设与实施，基本采用一般传统生态学原理，缺乏针对冰冻圈生态系统自身规律设置的相应举措。为此，需要基于冰冻圈生态功能特点、冰冻圈要素与生态系统之间的互馈作用关系出发，发展冰冻圈环境可持续维护基础上的冰冻圈生态承载力理论和评价方法，制定基于冰冻圈生态承载力的区域保护规划和生态服务利用方案。同时，通过制定共同行为准则和最佳实施方案，积极发展以适合于冰冻圈环境保护的生物措施，以生态系统规律管理冰冻圈环境。

4 冰冻圈生态学未来发展趋势

（1）多尺度融合与多技术结合的长期观测体系与全球共享网络。考虑到冰冻圈生物群落及其栖息地的巨大空间异质性，以及冰冻圈对气候变化的极度敏感性导致的生态系统格局、过程与功能的高度时间变异性等，要解答关于冰冻圈生态系统分布格局与功能的现状和未来趋势等相关的关键问题，迫切需要构建可以涵盖所有冰冻圈生境类型及生态系统类型的长期监测网络，并形成可融合不同尺度的足够的代表性样地。采用统一抽样设计、测量方法和分类标准，构建统一规范指导下的多尺度融合的长期监测体系。利用现有多种先进技术手段，发展“空、天、地”立体的综合观测试验平台体系，并实现全球冰冻圈数据共享网络。这就能够实现系统理解冰冻圈不同生态系统与气候、冰冻圈要素间密切交互且不断变化的生物地球化学和生物物理作用过程。

（2）冰冻圈-生物圈相互作用关系与机理。冰冻圈-生物圈相互作用是地球表层多圈层相互作用中最为复杂的过程，存在多方面未知领域，如明确原有生态系统随冰冻圈要素变化而出现类型更替、结构改变等显著变化节点及其阈限等。未来首先需要从深入理解冰冻圈主要生境要素变化对生态系统的影响机理出发，最终实现对冰冻圈-生物圈相互作用关系与机理的整体认识[9]，包括：① 积雪变化对生态系统组成、

结构和功能的影响，积雪变化对生物地球化学循环的影响与反馈；② 河湖冰变化对湖泊与河流淡水生态系统的影响，以及对相邻陆地和海洋生态系统的级联效应；③ 气候变化背景下冻土-植物生态相互作用关系与阈值，以及全球变化与冻土-生态系统演变理论与寒区陆地生态系统模型等。

（3）冰冻圈生物地球化学循环。现阶段冰冻圈生态系统碳循环研究主要关注的前沿问题是土壤异养呼吸的区分及贡献、环境变化下氮素循环及其对碳循环的耦合作用、冰冻圈地理过程（如侵蚀）或成土作用（如冻扰过程）的改变对碳循环的影响等。未来以冰冻圈碳循环为重点的前沿发展方向主要包括 4 个方面：① 冰冻圈碳源汇动态过程与驱动机制；② 冰冻圈碳-氮生物地球化学循环耦合作用；③ 冰冻圈碳循环的生态地理过程与冻扰作用，包括河流碳-氮输移通量的时空动态与驱动机制；④ 区域或全球尺度碳-氮平衡的关键地理过程及其尺度变异性等。

（4）冰冻圈生态系统动态模拟。现阶段一些应用较为广泛的陆地生态系统模式均在尝试应用于冰冻圈生态系统动态模拟研究中，但对冰冻圈过程考虑过于简单，基本不能刻画冰冻圈生态系统演变。因此，未来冰冻圈生态系统动态模型，需要加强基于多年冻土区植被动态演替机理的动态模拟、冰冻圈碳-氮-水耦合循环过程定量模拟，并将多年冻土区特殊土壤质地及其变化纳入生态系统模式中等。

（5）冰冻圈生态服务与生态安全。冰冻圈生态系统结构与格局显著变化，对区域生态系统服务和生态安全有何影响，是冰冻圈生态学研究最为薄弱的领域，明显滞后于其他温带、热带等区域的相关研究，预料未来这一问题的研究将成为冰冻圈科学领域的前沿和热点。应着重 5 个方面的研究：① 冰冻圈生态系统服务形成与稳定维持机制；② 冰冻圈生态系统服务评估与模拟；③ 寒区生态系统服务对冰冻圈变化的响应与区域生态安全调控；④ 探索冰冻圈变化下寒区生态系统服务维持和生态安全保障的调控对策与技术体系；⑤ 建立冰冻圈生态安全维护管理和保育策略与模式。

参考文献

1 秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学概论. 北京: 科学出版社, 2017.

2 CAFE. Arctic Biodiversity Assessment: Status and Trends in Arctic Biodiversity. Stell: Arctic Council, 2013.

3 Schmidt N M, Kristensen D K, Michelsen A, et al. High arctic plant community responses to a decade of ambient warming. Biodiversity, 2012, 13: 191-199.

4 Wang G X, Li Y S, Wu Q B, et al. Impacts of permafrost changes on alpine ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau. Science in China Series D-Earth Sciences, 2006, 49(11): 1156-1169.

5 Callaghan T V, Chernov Y, Chapin T, et al. Biodiversity, distributions and adaptations of arctic species in the context of environmental change. Ambio, 2004, 33(7): 404-417.

6 Maccario L, Sanguino L, Vogel T M, et al. Snow and ice ecosystems: Not so extreme. Research in Microbiology, 2015, 166(10): 782-795.

7 秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 中国学科发展战略·冰冻圈科学. 北京: 科学出版社, 2018.

8 Niittynen P, Heikkinen R K, Luoto M. Snow cover is a neglected driver of Arctic biodiversity loss. Nature Climate Change, 2018, 8(11): 997-1001.

9 王根绪, 宜树华. 冰冻圈变化的生态过程与碳循环影响. 北京: 科学出版社, 2019.

10 Tarnocai C, Canadel J G, Schuur E A G, et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23: GB2023.

11 Hudson J M G, Henry G H R. Increased plant biomass in a High Arctic heath community from 1981 to 2008. Ecology, 2009, 90(10): 2657-2663.

12 Melnikov I A. Recent sea ice ecosystem in the Arctic Ocean: A review// Nihoul J C J, Kostianoy A G, eds. Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions. Berlin: Springer Netherlands, 2009: 57-71.

13 Laidre K L, Stirling I, Lowry L F, et al. Quantifying the sensitivity of arctic marine mammals to climate-induced habitat change. Ecological Applications, 2008, 18(2): S97-S125.

14 Alexander J M, Kueffer C, Daehler C C, et al. Assembly of nonnative floras along elevational gradients explained by directional ecological filtering. PNAS, 2011, 108(2): 656-661.

15 Gottfried M, Pauli H, Futschik A, et al. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. Nature Climate Change, 2012, 2(2): 111-115.

16 Boertmann D, Nielsen R D. Geese, Seabirds and Mammals in North and Northeast Greenland: Aerial Surveys in Summer 2009. NERI Technical Report No.773. Greenland: National Environmental Research Institute, 2010.

17 Schuur E A G, Mcguire A D, Schädel C, et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. Nature, 2015, 520(7546): 171-179.

18 Natali S M, Watts J D, Rogers B M, et al. Large loss of CO_2 in winter observed across the northern permafrost region. Nature Climate Change, 2019, 9(11): 852-857.

19 Song C L, Wang G X, Mao T X, et al. Spatiotemporal variability and sources of DIC in permafrost catchments of the Yangtze River Source Region: Insights from Stable Carbon Isotope and Water Chemistry. Water Resources Research, 2020, 55: e2019WR025343.

20 Wild B, Andersson A, Bröder L, et al. Rivers across the Siberian Arctic unearth the patterns of carbon release from thawing permafrost. PNAS, 2019, 116(21): 10280-10285.

21 Cai W J, Chen L Q, Chen B S, et al. Decrease in the CO_2 uptake capacity in an ice-free arctic ocean basin. Science, 2010, 329(5991): 556-559.

22 Kitti H, Forbes B C, Oksanen J. Long- and short-term effects of reindeer grazing on tundra wetland vegetation. Polar Biology, 2009, 32(2): 253-261.

23 Eldridge D J, Bowker M A, Maestre F T, et al. Impacts of shrub encroachment on ecosystem structure and functioning: Towards a global synthesis. Ecology Letters, 2011, 14(7): 709-722.

24 Wang G X, Liu G S, Li C J, et al. The variability of soil thermal and hydrological dynamics with vegetation cover in a permafrost region. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 162: 44-57.

Cryosphere Ecosystems: Outpost and Barrier in Global Change

WANG Genxu[1*] YANG Yan[1] ZHANG Guangtao[2] CHANG Ruiying[1]

（1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China）

Abstract The closely reciprocal feedback between cryosphere and biosphere has constantly been intensified by global change, which strongly affects global management for environment and sustainable development of human-being. From the perspective of basic pattern and function of cryosphere ecosystems, and their response process and adaptive strategy to changing environment, we fully specified distribution patterns of cryosphere ecosystems and how it functioned for earth ecosystems and contributed to human well-being, briefly stated how it is most sensitive, thereby as an indicator to climate change, also pointed out cryosphere ecosystems as barrier function for maintaining biodiversity and increasing productivity, and finally put forward an effective way to facilitate ecosystems health in cryosphere. Totally, the common contents and corresponding study processes in cryosphere ecology were better to be introduced, even essential prospective of cryosphere ecology was included in this paper.

Keywords cryosphere ecosystems, structure and pattern, carbon stock, biodiversity, effects, regulation



王根绪 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所研究员、博士生导师，中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室主任，四川贡嘎山森林生态系统国家野外科学观测研究站站长。主要从事寒区生态系统与全球变化、生态水文学领域的研究。兼任中国生态学学会生态水文专业委员会主任、中国冰冻圈科学学会（筹）寒区生态专业委员会主任等职务。《山地学报》副主编，《生态学报》《植物生态学报》《应用生态学报》和*Journal of Mountain Science*等杂志编委。主持国家杰出青年科学基金、国家重点基金、国家“973”计划课题等17项。发表论文270余篇、出版专著5部。

E-mail: wanggx@imde.ac.cn

WANG Genxu Professor of Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences (CAS), Director of the Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences, and Director of the National Field Observation and Research Station of Gongga Mountain Ecosystem. His research focuses on the study of cryosphere ecosystem and global change and ecohydrology. He concurrently serves as the Director of the Ecohydrology Committee of the Chinese Society of Ecology and the Director of the Cryosphere Ecology Committee of the Chinese Society of Cryospheric Science (preparation). He is the editorial board members of many journals including *Journal of Mountain Science*, *Acta Ecologica Sinica*, *Chinese Journal of Plant Ecology*, *Chinese Journal of Applied Ecology*, and also the associate editor of *Mountain Research*. He is the leading principal investigator of 17 projects including National Science Fund for Distinguished Young Scholars of National Natural Science Foundation of China, National Key Project Funds, National 973 Projects, etc. He has published more than 270 papers and 5 monographs.

E-mail: wanggx@imde.ac.cn

■责任编辑：岳凌生

* Corresponding author